

А. В. ХИМЕНКО

РАСЧЁТНОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ТВЁРДОМ ТЕПЛОАККУМУЛИРУЮЩЕМ МАТЕРИАЛЕ С ВЫСОКИМИ ТЕПЛОАККУМУЛИРУЮЩИМИ СВОЙСТВАМИ

АННОТАЦИЯ Выполнено математическое моделирование теплообменных процессов, протекающих в твердых теплоаккумулирующих элементах из шамота в период заряда и отдачи теплоты электротепловым аккумулятором (ЭТА). Изготовлены экспериментальные образцы теплоаккумулирующих элементов и проведена серия экспериментальных исследований. По полученным экспериментальным данным можно судить о характере и динамике нагрева и охлаждения теплоаккумулирующих элементов. Проведен анализ и сравнение результатов численного моделирования с экспериментальными данными. Отмечена хорошая их сходимость.

Ключевые слова: электротепловой аккумулятор, электроотопление, теплоаккумулирующий материал, экспериментальное исследование тепловых процессов, численное моделирование теплообменных процессов, распределение температуры, режим заряда и отдачи теплоты.

A. KHIMENKO

COMPUTATIONAL AND EXPERIMENTAL RESEARCH OF THERMAL PROCESSES IN SOLID HEAT STORAGE MATERIALS WITH HIGH THERMAL STORAGE PROPERTIES

ABSTRACT A comprehensive calculated and experimental research of thermal processes in the solid heat storage elements of the proposed construction of two channels of circular cross section of chamotte. Adapted mathematical model of heat exchange processes to modes of operation electrothermal storage (ETS). Has been solved the direct conjugate heat conduction problem by finite element method. Reveals the factors which significantly influence the distribution of temperature in the heat storage element during the charge period and the heat output of ETS: natural convection in the air channel of heat storage element in charge of the period, the change of the heated air temperature along the channel height and heat transfer by radiation and convection from the outside ETS surface of the housing ETS. Experimental studies consist in measuring the temperatures at certain points of the heat storage elements and of the ETS using thermocouples chromel-alumel. The purpose of the experiment is to obtain data on the change of temperatures in the heat storage material, heat insulation, heated air in the channels and on the surface of the housing ETS during the period of the charge and the heat output. Obtained values of temperatures allows to judge about the nature and dynamics of heating and cooling the heat storage elements and also allow to check the validity of the obtained results of numerical modeling of heat transfer processes in heat storage elements ETS by comparing them.

Key words: electric heat storage, electric heating, heat storage material, experimental research of thermal processes, numerical modeling of heat exchange processes, the distribution of temperature, the charge mode and the heat output.

Введение

Применение электротепловых аккумуляторов (ЭТА) в качестве систем отопления позволит уменьшить потери электроэнергии в электросетях в ночное время, избавит от перерасхода топлива на ТЭС в связи с переводом электрогенераторов в режимы, отличных от номинальных, что также приводит к снижению КПД энергоустановок. Аккумуляция теплоты происходит за счет потребления электроэнергии в период минимальной нагрузки энергосистемы – ночное время, когда действуют понижающие тарифные коэффициенты на стоимость потребляемой электроэнергии. Это позволяет избежать резкого снижения нагрузки энергосистемы в ночное время, так называемых «провалов». Таким образом, при широком внедрении ЭТА могут выполнять функцию потребителей-регуляторов нагрузки энергосистемы. Для этого необходима оценка эффективности работы таких систем электроотопления, основанная на исследовании теплофизических характеристик и тепловых процессов, протекающих в ЭТА вовремя

его работы. Решение данной задачи может быть реализовано с помощью численных методов, а также путем проведения экспериментальных исследований.

В работах [1–4] было выполнено математическое моделирование теплообменных процессов, протекающих в ЭТА в режимах нагрева и отдачи теплоты. Были рассмотрены теплоаккумулирующие элементы с различной формой и размерами воздушных каналов и выбрана более рациональная схема теплоаккумулирующего элемента, которая обеспечивает низкий темп охлаждения, что выражается в более высоком значении температуры в конце периода отдачи теплоты по сравнению со стандартной конструкцией, а также равномерное распределение температуры в теплоаккумулирующем элементе в режиме нагрева и отдачи теплоты. Также были смоделированы различные режимы работы ЭТА с изменением скорости движения воздуха в каналах и различными временными интервалами режимов заряда и отдачи теплоты. Получено и проанализировано распределение температуры при нагреве и охлаждении трех видов

твердых теплоаккумулирующих материалов: магнезит, шамот, феоцит.

В приведённых работах исследовался подробно только один вид твёрдого теплоаккумулирующего материала – магнезит. При моделировании теплообменных процессов в воздушных каналах теплоаккумулирующих элементов не было учтено влияние естественной конвекции, а также изменение температуры воздуха по высоте канала в течение периода заряда ЭТА.

Необходимо также подтверждение полученных результатов численного моделирования экспериментальными данными о распределении температуры в твердом теплоаккумулирующем материале в течение периода заряда и отдачи теплоты ЭТА.

Цель работы

Математическое моделирование теплообменных процессов в теплоаккумулирующих элементах, а также экспериментальное исследование тепловых процессов, протекающих в рассматриваемом твердом теплоаккумулирующем материале в режиме заряда и отдачи теплоты ЭТА. Сопоставление полученных результатов с данными экспериментальных исследований.

Изложение основного материала

На первом этапе исследования была адаптирована математическая модель теплообменных процессов, протекающих в ЭТА в режиме заряда и отдачи теплоты, для предложенной конструкции теплоаккумулирующего элемента с двумя каналами круглого сечения из шамота. Для увеличения теплопроводящей способности шамота в период заряда ЭТА предложено использовать стальные пластины толщиной 2 мм с высоким значением коэффициента теплопроводности $\lambda_4 = 45,2 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°C)}$, установленные между теплоаккумулирующими элементами из шамота. Решена двумерная прямая сопряжённая задача теплопроводности. Применялся численный метод решения – методом конечных элементов.

Система дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial \tau} \left(r_1 c_1 \frac{\partial T_M}{\partial \tau} \right) = l_1 \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial^2 T_M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_M}{\partial y^2} \right) \\ \frac{\partial}{\partial \tau} \left(r_4 c_4 \frac{\partial T_{\text{МЕТ}}}{\partial \tau} \right) = l_4 \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial^2 T_{\text{МЕТ}}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{\text{МЕТ}}}{\partial y^2} \right) \end{cases} \quad (1)$$

Краевые условия:

– НУ: при $\tau = 0$, $T_{\text{СК}} = T_{\text{Ж1}} = T_{\text{Ж}}$;

– на Г1: $a_K (T_{\text{СК}} - T_{\text{Ж1}}) = -l_1 \frac{\partial T_{\text{СК1}}}{\partial x}$;
 $a_K = f(t)$; $T_{\text{Ж1}} = f(t)$;

– на Г2: $-l_2 \frac{\partial T_M}{\partial x} = q$; $q = \text{const}$;

– на Г3: $-\lambda_3 \frac{\partial T_{\text{С1}}}{\partial y} = a_3 (T_{\text{С1}} - T_{\text{Ж}}) +$
 $+ \epsilon_0 \frac{\partial}{\partial \tau} \left(\frac{\partial T_{\text{СК}} + 273}{\partial \tau} \right) - \frac{\partial}{\partial \tau} \left(\frac{\partial T_{\text{Ж}} + 273}{\partial \tau} \right) \frac{\partial}{\partial \tau} \left(\frac{\partial}{\partial \tau} \right)$;
 $a_3 = f(t)$; $T_{\text{Ж}} = \text{const}$;

– на Г4: $-l_1 \frac{\partial T_M}{\partial y} = -l_4 \frac{\partial T_{\text{МЕТ}}}{\partial y}$;
 $T_M(x, y) = T_{\text{МЕТ}}(x, y)$,

где $T_{\text{СК}}$ – температуры стенки воздушного канала, °С; $T_{\text{Ж}}$ – температура окружающей среды, °С; $T_{\text{Ж1}}$ – температура нагреваемого воздуха, °С; $T_{\text{С1}}$ – температура наружной поверхности теплоизоляции ЭТА, °С; a_K , a_2 – коэффициент теплоотдачи от стенки воздушного канала к потоку нагреваемого воздуха и от наружной поверхности тепловой изоляции к потоку окружающего воздуха, соответственно, Вт/(м²·°С); q – плотность теплового потока от стенок трубчатых электрических нагревателей (ТЭН), Вт/м²; l_1 , l_2 , l_3 , l_4 – коэффициент теплопроводности соответственно магнезита, стальной оболочки ТЭН, тепловой изоляции, металлической пластины, Вт/(м·°С); c_1 , c_4 – теплоемкость теплоаккумулирующего материала (ТАМ) и металла соответственно, кДж/(кг·°С); ρ_1 , ρ_4 – плотность ТАМ и металла соответственно; T_M – температура ТАМ, °С; $T_{\text{МЕТ}}$ – температура металлической пластины, °С; ϵ – степень черноты теплоаккумулирующего материала (0,228); c_0 – постоянная Стефана-Больцмана, 5,67 Вт/(м²·К⁴).

Теплоаккумулирующий элемент из шамота квадратного сечения размером 0,2' 0,2 м. По центру расположены два воздушных канала круглого сечения $d = 0,044$ м и ТЭН. Схема теплоаккумулирующего элемента предложенной конструкции с заданными ГУ представлена на рис. 1.

Схема задания граничных условий ГУ представлены на рис. 2.

В результате численного моделирования тепловых процессов в теплоаккумулирующем элементе ЭТА из шамота получено конечное распределение температурных полей в конце периода отдачи теплоты (см. рис. 3).

На втором этапе проведена серия экспериментов по исследованию тепловых процессов в твердых теплоаккумулирующих элементах из шамота.

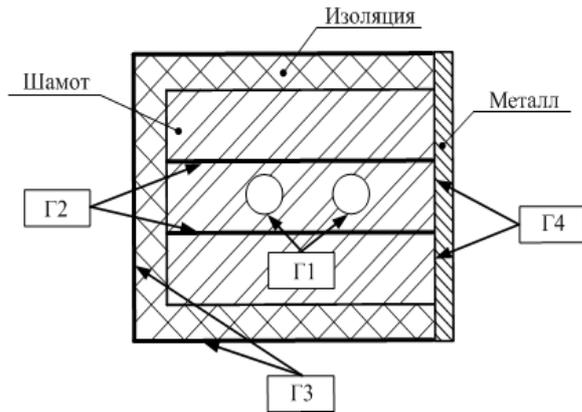


Рис. 1 – Схема элемента предложенной конструкции с заданными ГУ:

а – схема движения воздушного потока по каналам теплоаккумулирующего элемента ЭТА;
 б – горизонтальное сечение теплоаккумулирующего элемента с заданными ГУ

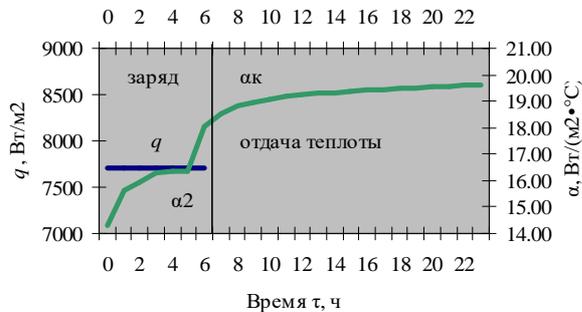


Рис. 2 – Графический вид задания ГУ для теплоаккумулирующего элемента из шамота

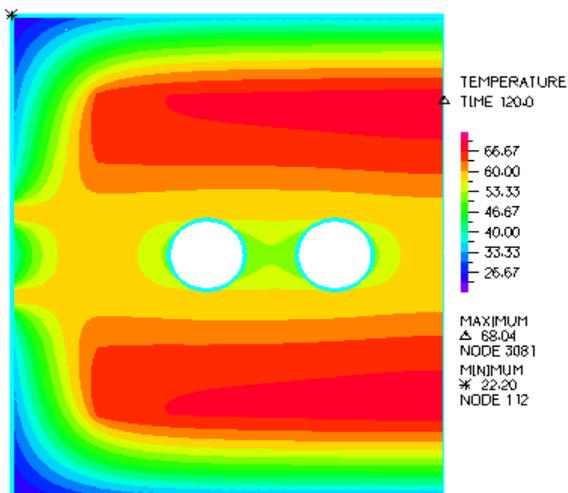
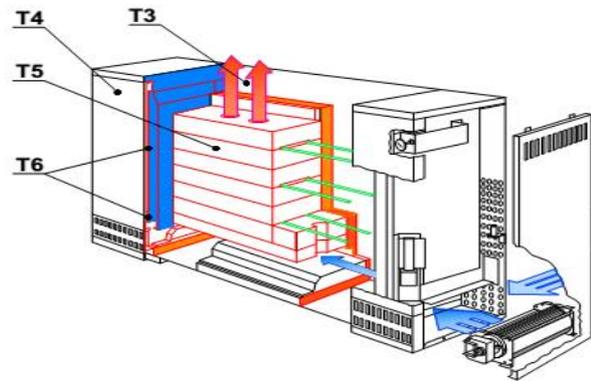


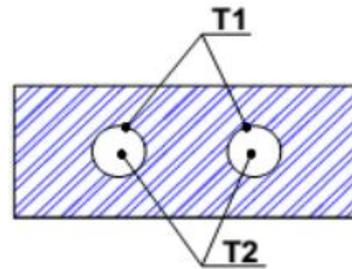
Рис. 3 – Конечное распределение температуры в теплоаккумулирующем элементе с двумя каналами круглого сечения из шамота в конце периода отдачи теплоты

Были изготовлены теплоаккумулирующие элементы из шамота с двумя каналами круглого сечения $d = 0,044$ м. Общая масса изготовленных

элементов в количестве 28 шт. составляет 58 кг. Масса одного элемента составляет 2–2,1 кг.



а



б

Рис. 4 – Схема экспериментальной установки по исследованию тепловых процессов в твердых теплоаккумулирующих элементах с высокими теплоаккумулирующими свойствами: а – схема ЭТА с теплоаккумулирующими элементами с двумя каналами круглого сечения с указанием мест установки термодатчиков ТХА; б – места установки термодатчиков ТХА в теплоаккумулирующих элементах в нижней и верхней зоне ЭТА;

T1 – измерение температуры в стенке канала теплоаккумулирующего элемента в нижней и верхней зоне ЭТА; T2 – измерение температуры нагреваемого воздуха в нижней и верхней зоне ЭТА; T3 – измерение температуры нагретого воздуха на выходе из ЭТА; T4 – измерение температуры на поверхности корпуса ЭТА; T5 – измерение температуры в толще теплоаккумулирующего элемента ЭТА; T6 – измерение температуры в толще тепловой изоляции в нижней и верхней зоне

Экспериментальные исследования заключаются в измерении температур в определенных точках теплоаккумулирующих элементов и самого ЭТА. Цель эксперимента – получить данные о изменении значений температур теплоаккумулирующего материала, тепловой изоляции, нагреваемого воздуха в каналах, а также на поверхности корпуса ЭТА в течение периода заряда и отдачи теплоты. Полученные значения температур позволя-

ют судить о характере и динамике нагрева и охлаждения теплоаккумулирующих элементов, а также позволяют проверить достоверность полученных результатов численного моделирования теплообменных процессов в теплоаккумулирующих элементах ЭТА путем их сопоставления.

В качестве первичных преобразователей температур использовались термопары хромель-алюмель (ТХА) в керамической оболочке с диапазоном измерений от $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $1300\text{ }^{\circ}\text{C}$. В области высоких температур (более $200\text{ }^{\circ}\text{C}$) термопары ТХА прокладывались в чехле из термостойкой ткани.

В качестве вторичного измерителя температур использовался универсальный контроллер температур УКТ-38.Щ4.ТП 8-ми канальный. Связь между УКТ-38.Щ4.ТП и ПК осуществляется при помощи адаптера интерфейса АС-2 по линия связи «токовая петля» RS-232. Суммарный предел основной приведённой погрешности для двух измерителей составляет 1 %.

Схема экспериментальной установки и схема теплоаккумулирующего элемента с указанием мест установки ТХА представлены на рис. 4.

На рис. 5 представлены в графическом виде результаты экспериментальных исследований.

Сопоставлены результаты численного моделирования теплообменных процессов в теплоаккумулирующем элементе ЭТА с результатами экспериментальных исследований на примере изменения температуры в стенке канала $T_{СК}$ теплоаккумулирующего элемента в нижней зоне (см. рис. б).

Обсуждение результатов

Немаловажными факторами, которые существенно влияют на распределение температуры в теплоаккумулирующем элементе в течение периода заряда и отдачи теплоты являются: естественная конвекция в воздушном канале теплоаккумулирующего элемента в период заряда, изменение температуры нагреваемого воздуха по высоте канала, а также теплоотдача путем излучения и естественной конвекции с наружной поверхности корпуса ЭТА. В период работы ЭТА в режиме отдачи теплоты в воздушных каналах ЭТА преобладает турбулентный режим течения жидкости (воздуха) и влияние естественной конвекции незначительно. Соблюдается условие $Gr Pr < 8 \cdot 10^5$ [5]. Числа Рейнольдса Re находятся в диапазоне 7000–8500. В [6] при числах Рейнольдса более 5000 и круглых каналах рекомендуется рассчитывать средние коэффициенты теплоотдачи по критериальным уравнениям для турбулентного режима течения. Указанные факторы обязательно необходимо учитывать при исследовании тепловых процессов в теплоаккумулирующем материале ЭТА.

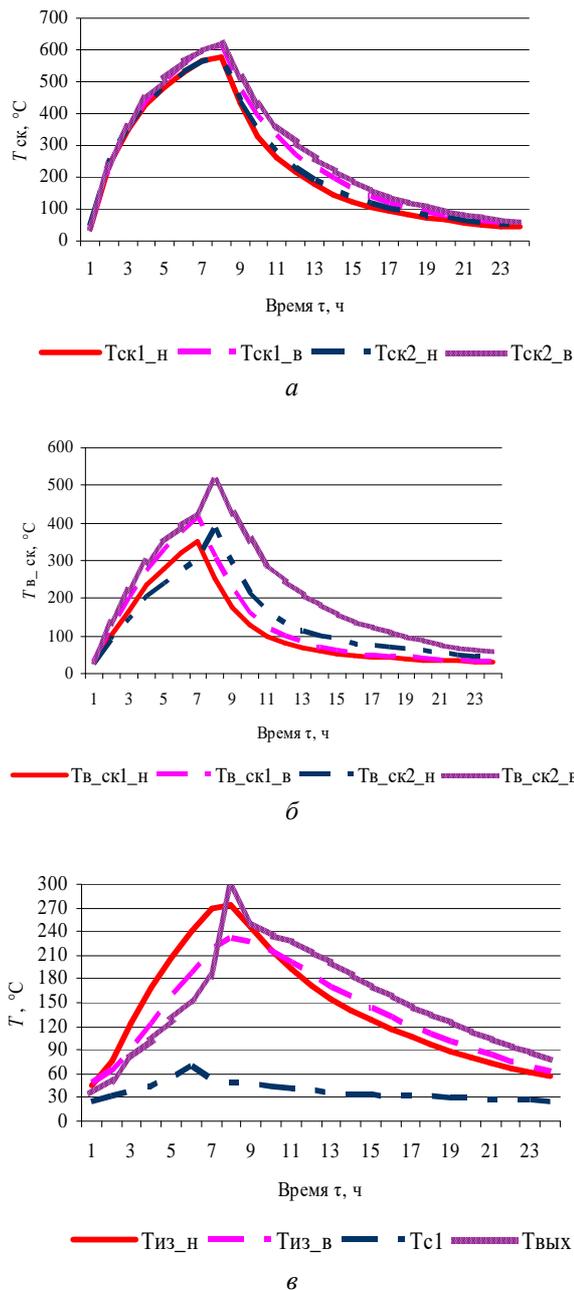


Рис. 5 – Результаты экспериментальных исследований: а – изменение температуры $T_{СК}$ в стенке канала теплоаккумулирующего элемента соответственно в нижней и верхней зоне; б – изменение температуры нагреваемого воздуха в канале $T_{В СК}$ в теплоаккумулирующем элементе соответственно в нижней и верхней зоне; в - изменение температуры тепловой изоляции $T_{ИЗ}$ в нижней и верхней зоне, на поверхности корпуса $T_{С1}$ и нагреваемого воздуха на выходе из ЭТА $T_{ВЫХ}$

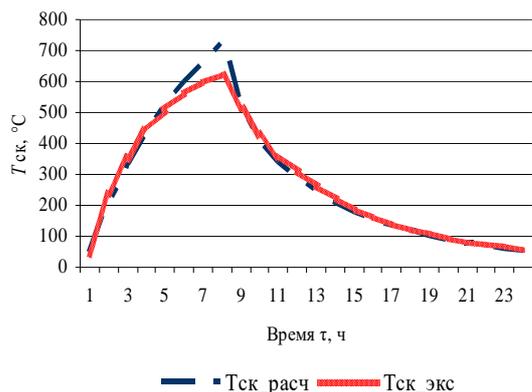


Рис. 6 – Сопоставление результатов численного моделирования теплообменных процессов в теплоаккумулирующем элементе с результатами экспериментальных исследований

Расхождение результатов численного моделирования с экспериментальными данными составляет не более 16 % в последние 2 часа периода заряда ЭТА. В остальное же время наблюдается практически идеальная сходимость экспериментальных данных и данных, полученных в ходе экспериментальных исследований (расхождение не более 1–2 %).

Выводы

Выполнено комплексное расчётное и экспериментальное исследование тепловых процессов в твердых теплоаккумулирующих элементах из шамота. Получено распределение температуры во времени в течение периода заряда и отдачи теплоты ЭТА в контрольных точках теплоаккумулирующего элемента в нижней и верхней зоне по высоте ЭТА, а также температура тепловой изоляции, нагреваемого воздуха в воздушном канале и на выходе из ЭТА. Проанализированы результаты численного моделирования и полученные экспериментальные данные, выявлена довольно хорошая их сходимость.

Список литературы

- 1 **Хименко, А. В.** Исследование режимов работы электрического теплового аккумулятора [Текст] / **А. В. Хименко, В. А. Тарасова** // Интегровані технології та енергозбереження. – 2013. – № 2. – С. 136–139. – ISSN 2078-5364.
- 2 **Тарасова, В. А.** Выбор рациональных геометрических параметров элемента электрического теплового аккумулятора [Текст] / **В. А. Тарасова, А. В. Хименко** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2013. – № 13(987). – С. 110–115. – Бібліогр. : 8 назв. – ISSN 2078-774X.
- 3 **Хименко, А. В.** Эффективность применения теплоаккумулирующих материалов в электрических тепловых аккумуляторах [Текст] / **А. В. Хименко** //

Стратегия качества в промышленности и образовании: тезисы доклада IX Международной научно-практической конференции, Болгария, 31 мая–7 июня. – Варна, 2013. – С. 219–223.

- 4 **Хименко, А. В.** Оценка и анализ тепловых параметров твердых теплоаккумулирующих элементов в режиме заряда и отдачи тепла электрического теплового аккумулятора [Текст] / **А. В. Хименко** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2014. – № 13(1056). – С. 156–161. – Бібліогр. : 7 назв. – ISSN 2078-774X.
- 5 **Исаченко, В. П.** Теплопередача. Учебник для вузов [Текст] / **В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел.** – 3-е изд. перераб. и доп. – М. : Энергия, 1975. – 488 с. ; ил.
- 6 **Кутателадзе, С. С.** Справочник по теплопередаче [Текст] / **С. С. Кутателадзе, В. М. Боришанский.** – М. : Госэнергоиздат, 1958. – 400 с.

Bibliography (transliterated)

- 1 **Khimenko, A. V. and Tarasova V. A.** (2013), ²Issledovanie rezhimov raboty jelektricheskogo teplovogo akumuljatora [Research of the modes of operation of the electric heat storage]², Integrovani tehnologii' ta energozberezhennja [Integrated technologies and energy saving], no. 2, pp. 136–139, ISSN 2078-5364.
- 2 **Tarasova V.A. and Khimenko, A.V.** (2013), ²Vybor racional'nyh geometricheskikh parametrov jelementa jelektricheskogo teplovogo akumuljatora [Choice of rational geometrical parameters element of electric thermal storage]², *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment*, no. 13(987), pp. 110–115, ISSN 2078-774X.
- 3 **Khimenko, A. V.** (2013), ²Jefferktivnost' primenenija teploakkumulirujushhih materialov v jelektricheskikh teplovyyh akumuljatorah [Efficiency application of heat storage materials in electrical heat storages]², Strategija kachestva v promyshlennosti i obrazovanii: tezisyy doklada IX Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, Bolgarija, 31 maja–7 ijunja [Strategy of quality in industry and education: abstracts of the IX International scientific-practical conference, Bulgaria, 31 May–7 June], Varna, pp. 219-223.
- 4 **Khimenko, A. V.** (2014), ²Ocenka i analiz teplovykh parametrov tverdyyh teploakkumulirujushhih jelementov v rezhime zarjada i otdachi tepla jelektricheskogo teplovogo akumuljatora [The Evaluation and Analysis of the Thermal Parameters of Solid Heat Storage Elements in Charging and Heat Emission Modes of the Electric Thermal Accumulator]², *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment*, no. 13(1056), pp. 156–161, ISSN 2078-774X.
- 5 **Isachenko, V. P., Osipova, V. A. and Sukomel, A. S.** (1975), *Teploperedacha. Uchebnik dlja vuzov* [Heat Transfer. Textbook for universities], Jenergija, Moscow, Russian.
- 6 **Kutateladze, S. S. and Borishansky V. M.** (1958), *Spravochnik po teploperedache* [Handbook of heat transfer], Gosjenergoizdat, Moscow, Russian.

Сведения об авторе (About author)

Хименко Алексей Викторович – младший научный сотрудник отдела геотермальной энергетики Института возобновляемой энергетики (ИВЭ) НАН Украины, Киев; e-mail: av-kh@yandex.ua; ORCID 0000-0003-2612-969X.

Khimenko Aleksey – junior researcher of geothermal energy department of the Institute renewable energy (IRE) NAS of Ukraine, Kiev; e-mail: av-kh@yandex.ua.

Пожалуйста ссылаетесь на эту статью следующим образом:

Хименко, А. В. Расчётное и экспериментальное исследование тепловых процессов в твердом теплоаккумулирующем материале с высокими теплоаккумулирующими свойствами [Текст] / **А. В. Хименко** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 10(1182). – С. 44–49. – Бібліогр. : 6 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2016.10.06.

Please cite this article as:

Khimenko, A. (2016), ²Computational and experimental research of thermal processes in solid heat storage materials with high thermal storage properties², *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment*, no. 10 (1182), pp. 44–49, ISSN 2078-774X, doi: 10.20998/2078-774X.2016.10.06.

Будь ласка посилайтеся на цю статтю таким чином:

Хіменко, О. В. Розрахункове та експериментальне дослідження теплових процесів в твердому теплоаккумулюючому матеріалі з високими теплоаккумулюючими властивостями [Текст] / **О. В. Хіменко** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 10(1182). – С. 44–49. – Бібліогр. : 6 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2016.10.06.

АНОТАЦІЯ Виконано математичне моделювання теплообмінних процесів, що протікають в твердих теплоаккумулюючих елементах з шамоту в період заряду і віддачі теплоти електротеплового акумулятора (ЕТА). Виготовлені експериментальні зразки теплоаккумулюючих елементів і проведена серія експериментальних досліджень. За отриманими експериментальними даними можна судити про характер та динаміку нагріву і охолодження теплоаккумулюючих елементів. Проведено аналіз та порівняння результатів чисельного моделювання з експериментальними даними. Відзначено непогану їх збіжність.

Ключові слова: електротепловий акумулятор, електроопалення, теплоаккумулюючий матеріал, експериментальне дослідження теплових процесів, чисельне моделювання теплообмінних процесів, розподіл температури, режим заряду і віддачі теплоти

Поступила (received) 03.01.2016